Centre de recherche sur les transports (C.R.T.)
Centre for Research on Transportation
CRT-2006-17

UN ALGORITHME DE MINIMISATION DU TRANSPORT À VIDE APPLIQUÉ À L'INDUSTRIE FORESTIÈRE

par

Catherine Gingras
Jean-François Cordeau
Gilbert Laporte

Août 2006

Université de Montréal
C.P. 6128, succursale Centre-ville, Montréal QC H3C 3J7 Canada
Téléphone : (514) 343-7575 / Télécopieur : (514) 343-7121

crt@crt.umontreal.ca
www.crt.umontreal.ca

HEC ÉCOLE POLYTECHNIQUE MONTRÉAL Université de Montréal

2007-00283

PUBLICATION
CRT-2006-17

UN ALGORITHME DE MINIMISATION DU TRANSPORT À VIDE APPLIQUÉ À L'INDUSTRIE FORESTIÈRE

par

Catherine Gingras[1]
Jean-François Cordeau[2]
Gilbert Laporte[2]

Les auteurs remercient le FERIC (Institut canadien de recherches en génie forestier) pour son soutien.

1. Institut canadien de recherches en génie forestier, 580 boulevard Saint-Jean, Pointe-Claire, Canada, H9R 3J9 (catherine-g@mtl.feric.ca)

2. HEC Montréal, 3000, chemin de la Côte-Sainte-Catherine, Montréal, Canada H3T 2A7 et Centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport (CIRRELT), Université de Montréal, C.P. 6128, succursale Centre-ville, Montréal, Canada H3C 3J7 (cordeau, gilbert@crt.umontreal.ca)

Dépôt légal – Bibliothèque nationale du Québec
Bibliothèque nationale du Canada, 2006

Résumé

Cet article décrit un problème de tournées de véhicules avec charges complètes se posant dans l'industrie forestière. On décrit MaxTour, une heuristique de gains qui permet de combiner plusieurs voyages en une seule tournée. L'application de cette heuristique à des données prévisionnelles réelles permet de générer des économies appréciables.

Mots-clefs : tournées de véhicules, charges complètes, heuristique de gains, industrie forestière.

Abstract

This article describes a vehicle routing problem with full loads arising in the forestry sector. It describes a savings heuristic, called MaxTour, which combines several trips in the same vehicle route. An implementation of this heuristic on real previsional data yields substantial gains.

Key words: vehicle routing, full loads, savings heuristic, forestry.

1. Introduction

Le Canada est l'un des rares pays développés encore dotés de vastes régions forestières. Les forêts canadiennes soutiennent une industrie prospère qui représentait, en 2003, une contribution au PIB de près de 33.7 milliards de dollars et engendrait près de 376 000 emplois directs (Ressources naturelles Canada, 2005). Cette industrie est grandement dépendante du marché des exportations puisque la grande majorité des produits forestiers fabriqués au Canada est vendue à l'étranger. Un tel contexte commercial exige, de la part des entreprises forestières canadiennes, de maintenir et d'accroître leur niveau de compétitivité. En effet, avec la concurrence qui se fait de plus en plus vive en raison de la présence accrue de concurrents étrangers, ainsi que des réglementations environnementales à venir concernant l'émission de gaz à effet de serre, les compagnies forestières canadiennes doivent viser à une gestion plus efficiente.

La gestion des activités associées au flux du bois dans l'industrie forestière comporte trois niveaux de planification (Carlsson et Rönnqvist, 1998). La planification stratégique s'effectue habituellement sur une base annuelle. Elle vise à satisfaire la demande annuelle en matière ligneuse aux scieries et aux usines de pâtes et papiers, avec les volumes disponibles provenant de différentes sources d'approvisionnement. La planification tactique s'étend sur une période de quelques mois à une semaine. Elle affecte les sources d'approvisionnement aux usines et identifie les possibilités de retours en charge. Le retour en charge signifie que le camion transporte une charge lorsqu'il retourne de sa destination vers son point d'origine (Rönnqvist, 1999). Enfin, la planification opérationnelle intègre, selon les plans stratégique et tactique établis au préalable, le routage et l'ordonnancement de chacun des camions dans le système.

Au Canada, les produits forestiers sont acheminés de plusieurs points d'origine à des points de destination à travers un vaste réseau de routes provinciales et forestières. Le transport de ces produits est majoritairement effectué en charges complètes. L'expression charge complète signifie qu'un chargement est transporté directement d'un point d'origine vers un point de destination sans être divisé en cours de route. À ce jour, la quasi-totalité des opérations de transport comporte un voyage de retour à vide; c'est-à-dire que le camion retourne à son point de départ sans cargaison utile (Figure 1). L'identification des possibilités de retours en charge n'était pas, jusqu'à très récemment, une priorité pour l'industrie forestière en raison de la nouveauté relative de ce concept dans ce milieu et de l'absence d'outils d'analyse appropriés.

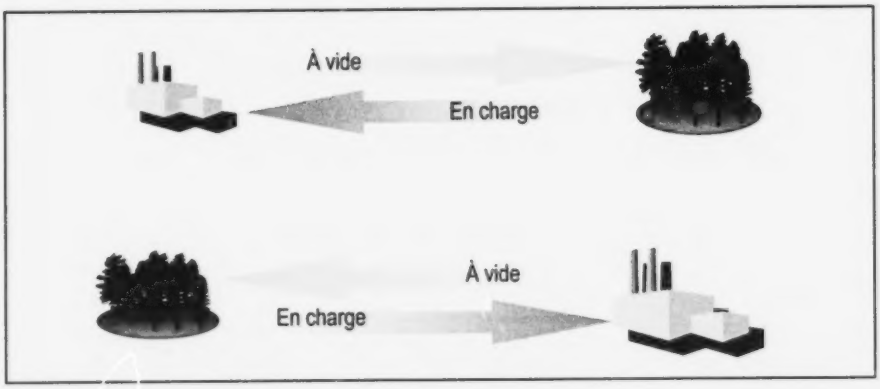

Figure 1. Configuration de transport traditionnelle

De plus, il est à noter que la gestion du transport au sein de l'entreprise est décentralisée en raison de la complexité engendrée par l'envergure du territoire couvert par les opérations forestières. Une telle démarche constitue un handicap majeur pour une planification tactique efficiente puisque les tournées potentielles comportant des retours en charge parcourent souvent plus d'une région de planification. De telles lacunes au niveau de la planification tactique entraînent des coûts de transport importants. Ceux-ci représentent, en moyenne pour l'industrie forestière, près de 40 % du coût d'approvisionnement en fibre des usines (Weintraub et al., 1996), dont 12 % correspondent à la consommation de carburant (FERIC, 2005).

Cet article décrit une heuristique permettant l'identification des possibilités de retours en charge. Même s'il n'est jamais possible pour les camions de retourner chargés vers les sites de coupe, il existe de nombreuses façons de maximiser les trajets avec charge utile. Citons, par exemple, la possibilité de prendre un chargement d'un site de coupe vers une usine, suite à une livraison, sur le chemin du retour en forêt. Pour effectuer la comparaison avec l'approche de transport traditionnelle, on peut comparer la Figure 2 à la Figure 1.

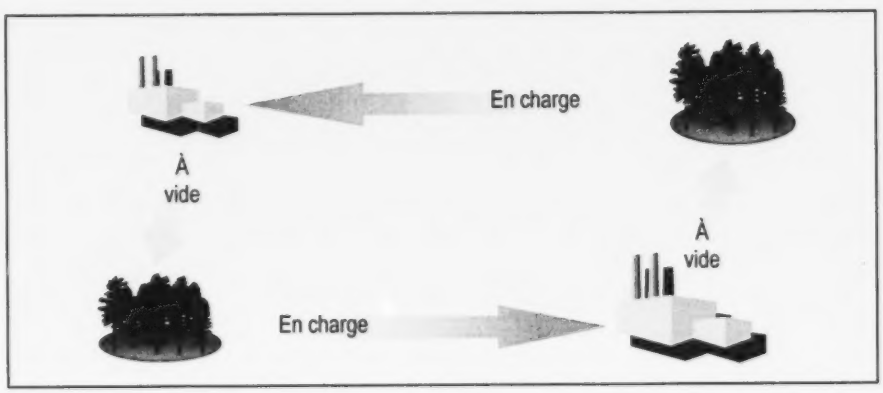

Figure 2. Configuration de transport comportant un retour en charge

Il y a aussi possibilité d'utiliser des remorques multi-usages permettant de transporter autant des copeaux que du bois rond (Jalinier, 1993 ; Brown et Michaelsen, 2003) sur un circuit triangulaire. Dans ce cas, on transporte du bois rond à une scierie et on apporte des copeaux à une usine de pâtes, avant de retourner vers la forêt de départ (Figure 3). Ainsi, en combinant plusieurs voyages dans une même tournée, il est possible de diminuer le transport à vide.

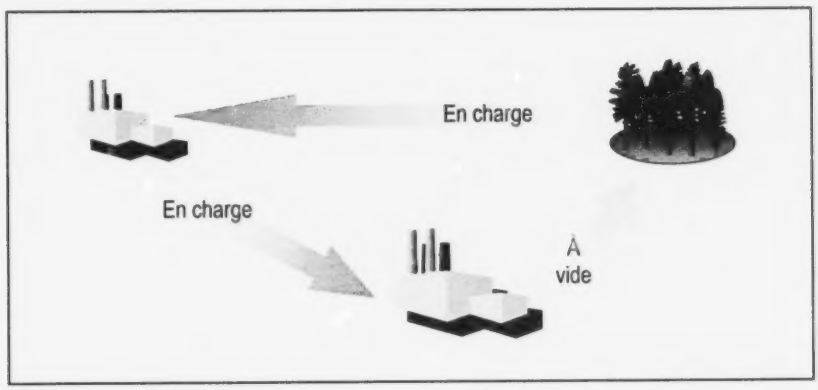

Figure 3. Configuration de transport comportant un retour en charge avec une remorque multi-usages

De nombreux chercheurs se sont intéressés à l'optimisation du transport dans l'industrie forestière. Ainsi, Palmgren, Rönnqvist et Varbrand (2004) ont étudié le transport du bois des aires de récolte jusqu'aux scieries et usines de pâtes et papiers. Williamson et Nieuwenhuis (1993), Rönnqvist et Carlson (1998), Murphy (2003) et Palander et al. (2003) ont optimisé l'allocation des volumes aux usines et les tournées de véhicules correspondantes. Shen et Sessions (1989), Linnainmaa, Savola et Jokinen (1994), Weintraub et al. (1996) ainsi que Palmgren, Rönnqvist et Värbrand (2004) ont développé des algorithmes permettant de tenir compte des fenêtres de temps sur les cueillettes et les livraisons.

Dans le problème à l'étude, on suppose que les demandes de transport entre origines et destinations sont connues. Le problème à résoudre est d'établir des plans de transport. D'un point de vue formel, ce problème peut être considéré comme une variante du problème classique de tournées de véhicules avec charges complètes (voir Ball et al., 1983, Skitt et Levary, 1985 et Desrosiers et al. 1985). Toutefois, notre problème comporte diverses caractéristiques propres à l'industrie forestière qui le distinguent du problème de base.

Les caractéristiques du problème à l'étude sont définies à la Section 2. Une heuristique appelée MaxTour est décrite à la Section 3, suivie de résultats numériques à la Section 4 et d'une conclusion à la Section 5.

2. Définition du problème

Un plan de transport est défini comme une liste de voyages $k \in K_p$ satisfaisant la demande en matière ligneuse des différentes usines durant la période p. Chaque voyage k est défini par une paire origine-destination (o_k, d_k), un temps de voyage t_k et un nombre de chargements n_{kp} à effectuer à la période p.

2.1 Les paires origine - destination (o_k, d_k)

L'ensemble I des origines est constitué de points de départ de marchandises qui peuvent représenter soit des blocs de coupe ou des usines. Un bloc de coupe désigne une zone en forêt où le bois est récolté et expédié vers les usines. Les usines sont aussi des points d'origine puisqu'on transporte différents produits ligneux en vrac d'une usine à une autre. L'ensemble J des destinations est constitué des points vers lesquels la matière ligneuse est acheminée. Une destination peut représenter une scierie ou une usine de pâtes et papiers. L'ensemble du réseau analysé dans le cadre de cette étude comprend 81 blocs de coupe et 41 usines.

2.2 Les périodes p

La liste K_p est constituée des voyages qui comportent une quantité de bois à transporter pour la période p. L'étude porte sur les prévisions de récolte pour l'année 2005 s'étendant ainsi sur quatre trimestres, donc $p = 1,...,4$. La répartition du volume transporté par période de temps représente un élément crucial de l'analyse et de la planification des opérations de récolte et, par ricochet, des opérations de transport puisque celles-ci sont significativement influencées par les conditions climatiques saisonnières.

2.3 Les temps de voyage t_k

Le temps t_k requis pour chaque voyage k comprend le temps de déplacement d'un camion chargé pour la paire origine-destination (o_k, d_k) et le temps de service. Le temps de service correspond à la durée des différentes opérations à effectuer pour traiter un chargement. Celui-ci comprend des temps de chargement, d'arrimage et d'attente. Le temps de service diffère selon le type de remorque utilisée et selon la nature du produit transporté. Le temps total de transport à vide d'une destination $j \in J$ à une origine $i \in I$, est dénoté par v_{ji}. Tous les calculs de temps de déplacement sont effectués à partir de la fonction « plus court chemin » du logiciel Interface Map qui permet de générer, de façon optimale, l'ensemble des temps de déplacement en charge et à vide entre les origines et destinations. Ces temps de déplacement prennent en considération la vitesse parcourue selon la classe de route.

2.4 Les coûts considérés

L'algorithme exécutera ses calculs en fonction du temps puisque la durée de la journée de travail représente l'aspect le plus contraignant du problème. Par contre, les coûts de transport seront utilisés lors de la

présentation et de l'analyse des résultats pour démontrer le potentiel réel de la méthode développée. Le coût de transport calculé par heure productive de camion est composé d'une partie fixe et d'une partie variable. La partie fixe inclut le salaire du chauffeur, l'amortissement de l'équipement de transport, l'immatriculation, les assurances et l'administration. La partie variable inclut la consommation de carburant qui dépend du poids du véhicule et du type de route, ainsi que les frais d'entretien. Ces calculs de coûts de transport effectués par Interface Map sont basés sur des données moyennes relevées par FERIC pour l'est du Canada.

2.5 Nombre de chargements n_{kp}

Afin de quantifier les économies potentielles, nous devons travailler avec une unité équivalente pour la quantité de matière ligneuse à transporter pour chaque voyage k. Les bases de données de l'entreprise forestière fournissent cette information en nombre de tonnes à transporter par période p pour chaque voyage k. Le tonnage ne représente pas une unité équivalente dans notre contexte puisque les divers produits transportés possèdent tous des densités distinctes. Interface Map convertit le tonnage des différents voyages k à la période p en nombre de chargements n_{kp}. Nous expliquerons, dans les lignes qui suivent, l'impact de ces différents éléments sur la détermination du nombre de chargements n_{kp}.

2.6 Les produits transportés

Les produits forestiers transportés existent sous deux formes : le bois rond et le bois en vrac. Le bois rond est transporté à partir des blocs de coupe aux usines et la matière ligneuse en vrac est transportée entre les différentes usines. Cette matière est constituée de différents sous-produits du bois tels les copeaux, les écorces, les sciures et les planures. Les produits du bois appartiennent à un grand nombre d'espèces. Nous avons agrégé les divers types d'espèces selon leur famille d'essences respective, soit les feuillus et les conifères. Chacune d'elle possède une densité différente.

2.7 Les types de remorque

Le nombre de chargements n_{kp} varie aussi en fonction de la capacité de chargement de la remorque utilisée puisque le nombre de tonnes transportées par chargement est directement relié à sa capacité. Nous considérerons différents types de remorque qui seront utilisés dépendamment de l'approche utilisée.

2.8 Contraintes du problème

Le problème à l'étude possède les caractéristiques suivantes :

1. Les bases des camions sont situées aux usines.
2. Les points de départ et d'arrivée d'une tournée sont les mêmes.
3. Il n'y a pas de limite au nombre de voyages pouvant constituer une tournée, en autant que le temps total de la tournée ne dépasse pas $\theta = 13$ heures. Cette valeur ne comprend pas le temps que le camionneur doit mettre pour se rendre à l'usine le matin et retourner à la maison le soir. Selon FERIC, les entreprises de

transport sont généralement situées à l'intérieur d'un rayon d'environ 50 km de l'usine. Cette distance additionnelle à la journée de travail permet tout de même de respecter les 15 heures de travail et de conduite permises par jour pour un camionneur, selon la réglementation canadienne en vigueur (Transports Canada, 2005). En ayant pour contrainte principale le temps total de la tournée et non la distance totale parcourue, on peut tenir compte de la vitesse à laquelle la distance a été parcourue ainsi que du temps de service. Donc, une tournée est admissible si la somme des temps de voyage t_k et de déplacement à vide v_{jl} de cette tournée est inférieure à θ.

4. Tous les chargements définis pour une période donnée doivent être transportés pendant la même période.
5. L'entreprise forestière a accès à des ressources de transport suffisantes pour traiter les volumes de bois rapportés pendant chaque période.

3. Heuristique de gains MaxTour

Nous avons développé une heuristique de gains, appelée MaxTour, qui permet d'identifier les retours en charge potentiels dans le réseau de distribution. Tel qu'illustré à la Figure 4, cet algorithme cherche à regrouper plusieurs voyages k en tournées de façon à obtenir une économie en termes de temps parcouru à vide.

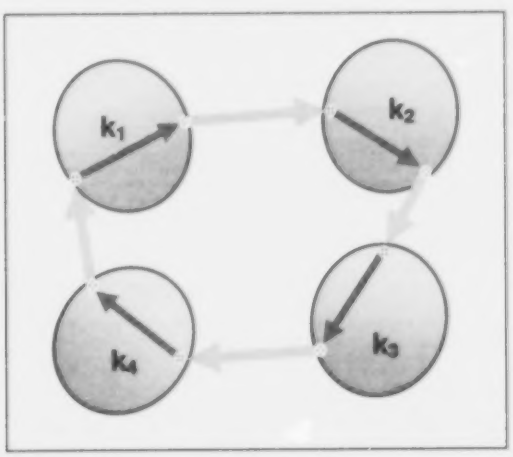

Figure 4. Agrégation de quatre voyages en une seule tournée

L'algorithme MaxTour est basé sur la méthode des gains de Clarke et Wright (1964) pour le problème classique de tournées de véhicules. Cette heuristique part d'une solution admissible constituée de n tournées aller-retour entre les clients et le dépôt. À chaque itération la méthode fusionne deux tournées produisant le plus grand gain, pourvu que la tournée fusionnée soit admissible.

Plusieurs modifications ont dû être apportées à la méthode des gains afin de l'adapter à notre problème. Tout d'abord, il faut noter que le réseau de distribution à l'étude contient plusieurs dépôts, comparativement à un

seul pour l'algorithme de Clarke et Wright. Par contre, à chaque itération de la procédure développée, un seul dépôt est considéré. La fusion des tournées s'effectue comme dans l'algorithme de Clarke et Wright sauf que celles-ci sont maintenant constituées de voyages plutôt que de points de livraison (Figure 5).

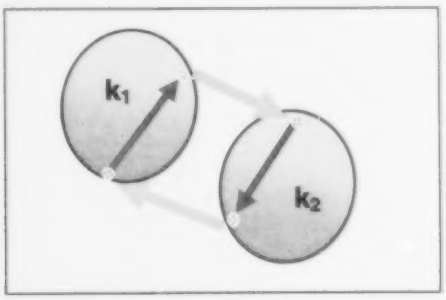

Figure 5. Combinaison des voyages 1 et 2

Ceci implique un ajustement dans le calcul des gains puisque chaque voyage possède son propre dépôt, soit l'usine associée au voyage en question. Également, les voyages combinés dans la même tournée comportent chacun des temps de voyage distincts et donc, pour respecter la contrainte de longueur, il faut vérifier que la somme des temps impliqués dans la tournée est inférieure à 13 heures. Enfin, puisque la méthode de Clarke et Wright ne considère qu'une seule visite à chaque point, nous devons, pour être en mesure de déterminer le gain total réalisé par les différentes tournées, tenir compte de la quantité transportée dans chacune des tournées. Pour ce faire, nous avons dû ajouter des étapes à la méthode de base. Une tournée peut être définie par l'ensemble T des voyages qui la constituent. On détermine le nombre maximal $n_{Tp} = \min_{k \in T}(n_{kp})$. Ce nombre sert à établir le gain qui sera effectué par cette tournée. Par la suite, une mise à jour des n_{kp} de chacun des voyages impliqués dans la tournée doit être effectuée en soustrayant n_{Tp} de n_{kp}. Cette opération est effectuée dans le but d'empêcher d'inclure un voyage dans une tournée subséquente lorsque celui-ci aura épuisé l'ensemble de ses n_{kp} chargements. Nous présentons maintenant une description détaillée de l'algorithme MaxTour.

Étape 1. Identifier des tournées présentant un gain

a) Pour chaque voyage de la liste K_p :
   1. La combiner avec chaque autre voyage de la liste K_p.
   2. Garder en mémoire les combinaisons (tournées) qui engendrent un gain positif et respectent la durée de la tournée.

b) Pour chaque tournée T admissible générée à l'étape précédente :
   1. La combiner avec chaque voyage k de la liste K_p non inclus dans T.

transport sont généralement situées à l'intérieur d'un rayon d'environ 50 km de l'usine. Cette distance additionnelle à la journée de travail permet tout de même de respecter les 15 heures de travail et de conduite permises par jour pour un camionneur, selon la réglementation canadienne en vigueur (Transports Canada, 2005). En ayant pour contrainte principale le temps total de la tournée et non la distance totale parcourue, on peut tenir compte de la vitesse à laquelle la distance a été parcourue ainsi que du temps de service. Donc, une tournée est admissible si la somme des temps de voyage t_k et de déplacement à vide v_{ll} de cette tournée est inférieure à θ.

4. Tous les chargements définis pour une période donnée doivent être transportés pendant la même période.
5. L'entreprise forestière a accès à des ressources de transport suffisantes pour traiter les volumes de bois rapportés pendant chaque période.

3. Heuristique de gains MaxTour

Nous avons développé une heuristique de gains, appelée MaxTour, qui permet d'identifier les retours en charge potentiels dans le réseau de distribution. Tel qu'illustré à la Figure 4, cet algorithme cherche à regrouper plusieurs voyages k en tournées de façon à obtenir une économie en termes de temps parcouru à vide.

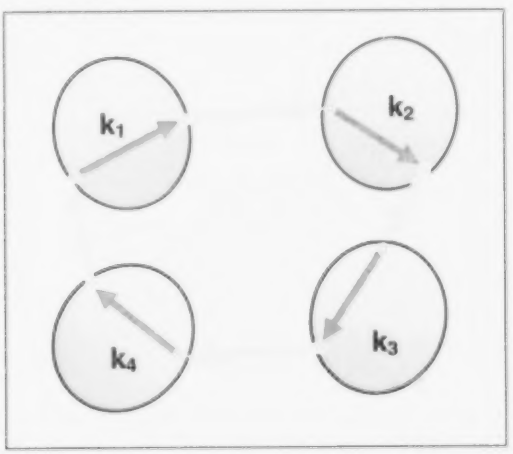

Figure 4. Agrégation de quatre voyages en une seule tournée

L'algorithme MaxTour est basé sur la méthode des gains de Clarke et Wright (1964) pour le problème classique de tournées de véhicules. Cette heuristique part d'une solution admissible constituée de n tournées aller-retour entre les clients et le dépôt. À chaque itération la méthode fusionne deux tournées produisant le plus grand gain, pourvu que la tournée fusionnée soit admissible.

Plusieurs modifications ont dû être apportées à la méthode des gains afin de l'adapter à notre problème. Tout d'abord, il faut noter que le réseau de distribution à l'étude contient plusieurs dépôts, comparativement à un

seul pour l'algorithme de Clarke et Wright. Par contre, à chaque itération de la procédure développée, un seul dépôt est considéré. La fusion des tournées s'effectue comme dans l'algorithme de Clarke et Wright sauf que celles-ci sont maintenant constituées de voyages plutôt que de points de livraison (Figure 5).

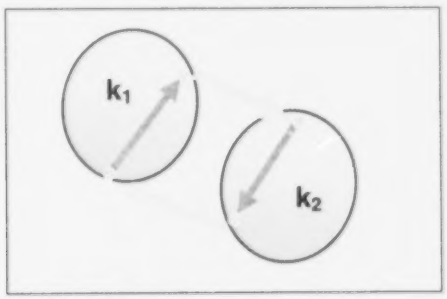

Figure 5. Combinaison des voyages 1 et 2

Ceci implique un ajustement dans le calcul des gains puisque chaque voyage possède son propre dépôt, soit l'usine associée au voyage en question. Également, les voyages combinés dans la même tournée comportent chacun des temps de voyage distincts et donc, pour respecter la contrainte de longueur, il faut vérifier que la somme des temps impliqués dans la tournée est inférieure à 13 heures. Enfin, puisque la méthode de Clarke et Wright ne considère qu'une seule visite à chaque point, nous devons, pour être en mesure de déterminer le gain total réalisé par les différentes tournées, tenir compte de la quantité transportée dans chacune des tournées. Pour ce faire, nous avons dû ajouter des étapes à la méthode de base. Une tournée peut être définie par l'ensemble T des voyages qui la constituent. On détermine le nombre maximal $n_{Tp} = \min_{k \in T}(n_{kp})$. Ce nombre sert à établir le gain qui sera effectué par cette tournée. Par la suite, une mise à jour des n_{kp} de chacun des voyages impliqués dans la tournée doit être effectuée en soustrayant n_{Tp} de n_{kp}. Cette opération est effectuée dans le but d'empêcher d'inclure un voyage dans une tournée subséquente lorsque celui-ci aura épuisé l'ensemble de ses n_{kp} chargements. Nous présentons maintenant une description détaillée de l'algorithme MaxTour.

Étape 1. Identifier des tournées présentant un gain

a) Pour chaque voyage de la liste K_p :
   1. La combiner avec chaque autre voyage de la liste K_p.
   2. Garder en mémoire les combinaisons (tournées) qui engendrent un gain positif et respectent la durée de la tournée.

b) Pour chaque tournée T admissible générée à l'étape précédente :
   1. La combiner avec chaque voyage k de la liste K_p non inclus dans T.

2. Garder en mémoire les nouvelles tournées qui respectent les conditions de gain et de durée.
3. Répéter l'étape b) tant que des fusions sont possibles.

Étape 2. Ordonner la liste de tournées en ordre décroissant de la valeur du gain

Étape 3. Établir la liste des tournées incluses dans la solution

Pour chaque tournée T de la liste de tournées :

1. Déterminer n_{Tp}.
2. Garder en mémoire cette tournée dans la solution.
3. Faire $n_{kp} = n_{kp} - n_{Tp}$ pour chaque $k \in T$.

Cette procédure permet d'obtenir une solution admissible, soit une liste qui comprend l'ensemble des combinaisons de voyages présentant un gain en termes d'économie de temps parcouru à vide. Les voyages restants, c'est-à-dire ceux qui ne font pas partie de cette solution, devront donc être effectués avec un retour à vide.

4. Résultats numériques

L'algorithme MaxTour a été codé en Delphi et intégré comme module d'optimisation au logiciel Interface Map. Les expérimentations présentées dans le cadre de cette section ont été effectuées sur un Pentium 4, 2.4 Ghz avec 512 MB de mémoire vive.

Dans un premier temps, nous avons évalué les opportunités de retour en charge pour l'entreprise forestière dans la zone étudiée à partir des prévisions pour l'année 2005. Pour ce faire, nous avons procédé à une comparaison entre l'approche traditionnelle, que nous dénommerons scénario 1, et celle comportant des retours en charge, qui tiendra lieu de scénario 2. En complément à cette analyse, une étude a été effectuée sur les possibilités de retour en charge selon la forme de produit transporté.

Nous présentons au Tableau 1 les statistiques associées à chacun des deux scénarios. Comme tous les résultats de cette section, il s'agit de prévisions de valeurs annuelles moyennes fournies par FERIC.

Tableau 1. Temps et coûts de transport

	Scénario 1	*Scénario 2*
Temps à vide (h)	*494 292*	*434 431*
Temps total de transport (h)	*1 443 069*	*1 432 459*
Coût à vide ($)	*34 073 127*	*24 875 387*
Coût total de transport ($)	*126 391 952*	*121 369 455*

On observe que le temps de transport à vide correspond à 34% du temps total pour le scénario 1 et à 27% pour le scénario 2.

Il est maintenant possible d'évaluer le gain potentiel engendré par l'approche avec retours en charge. Le temps à vide du scénario 2 présente une diminution importante de 11.6 % par rapport au scénario 1. Par contre, par rapport au temps total, cette diminution s'avère moins significative, soit de 0.7 %. L'évolution non linéaire du temps total de transport par rapport au temps à vide avec l'approche retours en charge est due aux caractéristiques particulières des remorques multi-usages qui doivent être utilisées selon ce scénario. En effet, les remorques multi-usages possèdent une capacité de chargement plus restreinte que les remorques traditionnelles. Il en résulte une augmentation du nombre de chargements à transporter pour un volume donné, comparativement aux remorques traditionnelles et donc des coûts de transport accrus. Toutefois, le coût de transport est 4 % moins élevé pour le scénario 2 que pour le scénario 1.

À l'heure actuelle, les transporteurs travaillant pour l'entreprise forestière dans la zone étudiée ne possèdent pas de remorques multi-usages. De façon à introduire progressivement l'approche de retours en charge, il convient de dissocier les possibilités de retours en charge selon la nature du produit. Ainsi, en utilisant les moyens de transport actuels, soit les remorques à bois rond et remorques à vrac, il sera possible de déterminer s'il existe des possibilités de faire des combinaisons de voyages seulement pour le bois rond, ou seulement pour les produits en vrac. Le Tableau 2 présente la comparaison entre les résultats du scénario 2 de l'analyse principale avec la somme des résultats pour le vrac et le bois rond.

Tableau 3. Comparaison des résultats entre l'analyse principale et l'analyse par forme de produit

	Bois rond et vrac	**Scénario 2**	**Écart**
Temps à vide (h)	*472 296*	*434 431*	*8 %*
Temps total (h)	*1 429 294*	*1 432 459*	*-0.2 %*
Coût à vide ($)	*30 046 152*	*24 875 387*	*17.2 %*
Coût total ($)	*122 766 300*	*121 369 455*	*1.1 %*

Il est intéressant d'observer que l'analyse principale, basée sur l'utilisation de remorques multi-usages, permet de réduire considérablement, soit de 8 %, le temps à vide par rapport aux cas où les combinaisons de voyages sont limitées au même produit. En revanche, les coûts additionnels qu'entraîne l'utilisation de remorques multi-usages réduisent cet écart au niveau des coûts totaux de transport puisqu'on obtient seulement 1.1 % de diminution supplémentaire par rapport à l'utilisation exclusive de remorques traditionnelles. En termes monétaires, cette diminution se traduit par un gain de 1 396 845 $ par année, un montant qui, dépendamment de l'appréciation des gestionnaires en place, pourrait justifier l'utilisation de remorques multi-usages.

5. Conclusion

Nous avons étudié un problème de tournées de véhicules avec charges complètes et multi-dépôts dans le contexte forestier. Le problème a été résolu à l'aide de l'algorithme MaxTour inspiré de la méthode des gains de Clarke et Wright (1964). La contribution principale de cette étude est de fournir aux dirigeants de l'entreprise une approche de résolution heuristique efficace et flexible pour leur problème de distribution. La méthode MaxTour s'est effectivement avérée prometteuse en démontrant la possibilité de réduire de 11.6 % le temps parcouru à vide pour une diminution de 4 % du coût total de transport se traduisant en une économie de plus de 5 000 000 $ pour l'année 2005. Une telle amélioration de la planification tactique au sein de l'entreprise procurera aux gestionnaires de transport l'information nécessaire qui leur permettra d'effectuer une planification opérationnelle plus efficiente. Ainsi, des tournées comprenant des retours en charge pourront être mises en place pour une réduction substantielle des coûts due à une meilleure utilisation des équipements de transport et à une diminution de la consommation de carburant, ce qui s'avère très intéressant pour la compagnie forestière et également pour l'environnement.

Il faut toutefois souligner les diverses limites que comporte cette étude. Tout d'abord, il est possible que la méthode de résolution employée dans ce travail surestime le potentiel économique réel car les conditions opérationnelles influençant le transport comme les feux de forêts, les épidémies d'insectes et les inondations, n'ont pas été considérées dans la conception de l'algorithme. Enfin, dans l'industrie forestière, plusieurs joueurs indépendants influencent le cours des opérations autant en forêt, que sur la route et dans les usines. Il s'avère impératif que chacun d'eux reconnaisse l'importance de la coopération et de l'intégration des activités pour que notre approche puisse être implantée avec succès. En effet, chaque partenaire a tendance à prendre des décisions menant à l'atteinte des objectifs personnels à court terme au détriment des gains qui pourraient être réalisés par l'ensemble des partenaires à long terme (Rönnqvist, 1999).

Remerciements

Les auteurs remercient FERIC (Institut canadien de recherches en génie forestier) pour son soutien.

Bibliographie

Ball, M.O., Golden, B.L., Assad, A.A, Bodin, L.D., 1983, Planning for truck fleet size in the presence of a common-carrier option. *Decisions Sciences* 14, 103-120.

Bodin, L.D., Golden, B.L., Assad, A.A., Ball, M.O., 1983, Routing and scheduling of vehicles and crews. The state of the art. *Computers & Operations Research* 10, 69-211.

Brown, M., Michaelsen, J., 2003, *Économies potentielles d'énergie et de coût dues à l'utilisation de remorques polyvalentes au Canada*, Rapport Avantage FERIC, vol.4 n°25, 4 pages.

Carlsson, D., Rönnqvist, M., 1998, Tactical planning of forestry transportation with respect to backhauling, Report LiTH-MAT-R-98-13. *Linköping Institute of Technology*. Linköping, Suède.

Clarke, G., Wright, J.R., 1964, Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research* 12, 568-581.

Desrosiers, J., Laporte, G., Sauvé, M., Soumis, F., Taillefer, S., 1988, Vehicle routing with full loads. *Computers & Operations Research* 15, 219-226

FERIC (2005). Communications privées.

Jalinier, C., 1993, *Les remorques multi-usages*, Communiqué technique N° : Chargement & Camionnage-32,

Linnainmaa, S., Savola, J., Jokinen, O., 1994, EPO: A knowledge based system for wood procurement management. *Proceedings of the 7th Innovative Applications of Artificial intelligence Conference*, 107-113.

Murphy, G., 2003, Reducing trucks on the road through optimal route scheduling and shared log transport services. *Southern Journal of Applied Forestry* 27, 198-205.

Palander, T., Väätäinen, J., Laukkanen, S., Malinen, J., 2003, Modeling backhauling on finnish energy-wood network using minimizing of empty routes, University of Joensuu, Finland. *International Journal of Forest Engineering* 15, 79-84.

Palmgren, M., Rönnqvist, M., Värbrand, P., 2004, A near-exact method for solving the log-truck scheduling problem. *International Transactions in Operational Research* 11: 447-464.

Ressources naturelles Canada (2005) Examen annuel et perspectives économiques de l'industrie forestière canadienne : 2004-2005 , [En ligne], [http://www.nrcan.gc.ca/cfsscf/national/ whatquoi/ pub_ annuale conrev_ f.html].

Rönnqvist, M., 1999, Wood flow problems in the Swedish forestry, Skog Forsk, Report No 1. *The forestry Research Institute of Sweden.*

Shen, Z., and Sessions, J., 1989, Log truck scheduling by network programming. *Forest Products Journal* 39, 47-50.

Skitt, R.A., Levary, R.R., 1985, Vehicle routing via column generation. *European Journal of Operational Research* 21, 65-76.

Transports Canada (2005a). Lois et réglements, [En ligne], [http://www.tc.gc.ca/lois-reglements/GENERALE/L/ltr/reglements.html].

Weintraub, A., Epstein, R., Morales, R., Seron, J., Traverso, P., 1996, A truck scheduling system improves efficiency in the forest Industries. *Interfaces* 26 (4), 1-12.

Williamson, G., Nieuwenhuis, M., 1993, Integrated timber allocation and transportation planning in Ireland. *Journal of Forest Engineering* 5, 7-15.